

# OFDM 시스템에서 PAPR 감소 기법의 연접

허석중\*, 김기훈\*, 장민호°

## Concatenation for PAPR Reduction Schemes in OFDM Systems

Seok-Joong Heo\*, Kee-Hoon Kim\*,  
 Min-Ho Jang°

### 요약

본 논문은 직교 주파수 분할 다중 반송파 (OFDM; orthogonal frequency division multiplexing) 신호에 대한 최대 전력 대 평균 전력 비율 (PAPR; peak to average power ratio) 값의 확률적 분포를 향상시킬 수 있는 선택 사상 (SLM; selected mapping) 기법과 PAPR 값 자체를 제한하는 톤 예약 (TR; tone reservation) 기법을 연접 (concatenation)하는 방법을 제안한다. 제안된 연접 기법은 계산 복잡도를 거의 증가시키지 않으면서도 기존 OFDM 시스템의 PAPR 감소를 위한 다양한 기법들과 비교하여 PAPR 성능 개선을 확인할 수 있다.

**Key Words** : Clipping, concatenation, OFDM (orthogonal frequency division multiplexing), PAPR (peak to average power ratio), SLM (selected mapping), TR (tone reservation)

### ABSTRACT

This paper presents the concatenation method between selected mapping (SLM) scheme for improving the probabilistic distribution of the peak-to-average power ratio (PAPR) and tone

reservation (TR) scheme for limiting the PAPR value in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems. The proposed concatenation scheme shows the improvement of PAPR performance with little increase in computational complexity compared to the conventional PAPR reduction schemes.

### I. 서론

직교 주파수 분할 다중 반송파 (OFDM; orthogonal frequency division multiplexing) 시스템은 높은 주파수 효율성을 기반으로 고속 데이터 전송이 가능하기 때문에 최근까지 다양한 유·무선 통신네트워크 표준으로 채택되어 상용화되었다. 하지만 OFDM 시스템은 시간 영역 신호에 대한 최대 전력 대 평균 전력 비율 (PAPR; peak to average power ratio)이 큰 단점으로 인하여 비선형 고전력 증폭기 사용 과정에서 신호가 변형되는 문제가 발생한다. 이에 PAPR 감소를 위한 다양한 연구가 크게 두 가지 관점에서 진행되었다<sup>[1,2]</sup>. 첫 번째는 클리핑 (clipping)과 톤 예약 (TR; tone reservation) 기법과 같이 OFDM 신호의 PAPR 값을 임계값보다 절대적 (deterministic)으로 작게 만드는 방법이고, 두 번째는 선택 사상 (SLM; selected mapping)과 부분 전송 수열 (PTS; partial transmit sequence) 기법과 같이 OFDM 신호에 대한 PAPR 값의 확률적 (probabilistic) 분포를 향상시키는 방법이다.

본 논문에서는 PAPR 값의 확률적 분포를 개선할 수 있는 SLM 기법과 PAPR 값 자체를 제한하는 TR 기법을 연접하는 방법을 제안하고, 그에 따른 성능 개선을 모의실험 결과로 확인하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 OFDM 시스템 모델을 소개하고, PAPR 감소 기법들을 연접하는 방법을 제안한다. III장은 제안된 연접 기법에 대한 모의실험 결과를 보여준다. 이를 통하여 제안된 기법의 PAPR 성능 개선을 확인하고, IV장에서 본 논문의 결론을 제시한다.

\* 본 연구는 2017년 울산과학기술대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

• First Author : (ORCID:0000-0002-8819-9880)Korea Credit Information Services, seokjoong.heo@gmail.com, 정희원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-9195-5184)School of Electrical and Electronic Engineering, Ulsan College, mhjang@uc.ac.kr, 종신희원

\* (ORCID:0000-0002-0438-8036)Department of Electronic Engineering, Soonchunhyang University, keehk85@gmail.com, 종신희원  
 논문번호 : 202001-007-A-LU, Received January 14, 2020; Revised January 27, 2020; Accepted January 28, 2020

## II. PAPR 감소 기법의 연접

$N$ 개의 부 반송파를 사용하는 OFDM 시스템에서 입력 심볼 시퀀스  $\mathbf{A}=[A_0, A_1, \dots, A_{N-1}]^T$  에 대하여 이산 시간  $t$ 에서 OFDM 송신 신호 시퀀스  $\mathbf{a}=[a_0, a_1, \dots, a_{N-1}]^T$  는 다음과 같이 표현된다.

$$a_t = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{j2\pi \frac{n}{N} t}, \quad 0 \leq t \leq N-1 \quad (1)$$

또한 OFDM 신호에 대한 PAPR은 최대 전력과 평균 전력의 비율로 다음과 같이 정의된다<sup>[2]</sup>.

$$PAPR_{\mathbf{a}} = \frac{\text{MAX}_{0 \leq t \leq N-1} |a_t|^2}{E[|a_t|^2]} \quad (2)$$

이제 PAPR 감소 기법들을 사용하여 연접을 적용하기 위한 시스템 모델은 다음 그림 1과 같다.

연접 과정에서, 우선적으로 OFDM 신호의 PAPR 값의 확률적 분포를 개선할 수 있는 SLM 기법을 적용하고, 연속적으로 PAPR 값을 절대적으로 작게 만들기 위하여 TR 기법을 사용하도록 한다. SLM 기법<sup>[1]</sup>은 입력 심볼 시퀀스를 미리 결정된 여러 개의 위상 시퀀스와 곱하여 서로 다른 심볼 시퀀스들을 생성하고, 이 시퀀스들을 역 푸리에 변환하여 OFDM 신호 시퀀스들을 만들고 각각의 PAPR 값을 계산한다. 최종적으로 가장 작은 PAPR 값을 갖는 OFDM 신호 시퀀스를 선택하여 전송하고 위상 시퀀스의 색인(index) 정보를 부가적으로 송신한다. 또한 TR 기법<sup>[2]</sup>은 일부 예약된 톤(reserved tone)을 이용하여 각 단계에서의 피크 신호를 반복적으로 줄여가는 방법이다. 전체 톤을 데이터 전송을 위한 톤과 PAPR 감소를 목적으로 예약된 톤으로 구분하여 사용하기 때문에, 데이터 전송 효율을 감소시키는 단점을 갖는다. 이러한 SLM 및 TR 기법을 사용하면 신호의 PAPR을 줄일 수 있기 때문에, 송신단의 비선형 고전력 증폭기(HPA; high power amplifier)를 통과할 경우 발생하는 대역 내 왜곡(in-band distortion)과 대역 외 방사

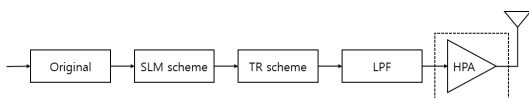


그림 1. PAPR 감소 기법들의 연접을 위한 시스템 모델  
Fig. 1. System model for the concatenation between PAPR reduction schemes

(out-of-band radiation)과 같은 신호 왜곡을 줄일 수 있다.

한편, SLM 기법은 위상 시퀀스의 개수  $U$ 가 증가함에 따라 연산량은 지수적으로 증가하지만 PAPR은 완만하게 감소되며, TR 기법은 PAPR을 감소시키기 위한 반복적 과정으로 인하여 PAPR 감소 성능은 우수하지만 연산량이 크고 데이터 처리율(throughput)이 열화되는 문제가 있다. 그러므로 SLM 기법을 먼저 적용하여 클리핑이 발생할 확률을 낮추고, 이렇게 확률 분포를 개선한 이후에 TR 기법을 적용하여 OFDM 신호에 대한 PAPR을 목표 PAPR까지 감소시키는 순서로 연접을 진행한다.

## III. 모의실험 결과

OFDM 시스템의 PAPR 감소 기법의 연접을 통한 PAPR 성능 개선을 확인하기 위하여 SLM 기법과 TR 기법의 연접을 고려하자. 모의실험을 위하여 입력 데이터는 16-QAM으로 변조하였으며, 256개의 톤을 이용하는 OFDM 시스템을 가정하였다. 이때 보호 대역은 별도로 고려하지 않았다. 그림 2는 각각 SLM 기법, 클리핑 기법, TR 기법, 그리고 연접 기법을 사용한 OFDM 신호에 대하여 수치적으로( Numerically) 계산된 상보 누적 분포 함수(CCDF; complementary cumulative distribution function)를 보여준다. 여기서  $U$ 는 SLM 기법에 사용되는 위상 시퀀스의 개수를 의미하고, CR은 클리핑률<sup>[3]</sup>(clipping ratio)을 나타낸다. 또한 TR 기법을 사용한 경우, 각 단계에서 피크 신호를 반복적으로 줄이기 위하여 예약된 톤을 사용하는 데, 이러한 예약된 톤의 비율(데이터 전송률 손실 비율)을 5% 혹은 10%로 설정하였으며, 최대 반복 횟수는 40번으로 제한하였다.

그림 2에서 제안된 연접 기법의 PAPR 감소 성능이  $U=32$ 인 SLM 기법과 예약된 톤의 비율이 5%인 TR 기법보다 우수함을 확인할 수 있다. 계산 복잡도를 살펴보면 제안된 SLM/TR 연접 기법은 평균 반복 횟수를 고려했을 때, 고속 푸리에 변환(FFT; fast Fourier transform) 연산량 기준으로 평균 34.41회의 FFT로 볼 수 있으며,  $U=32$ 인 SLM 기법은 32회의 FFT, 5% TR 기법은 평균 30.95회의 FFT로 볼 때, 계산 복잡도면에서도 비슷한 수준이다.

그림 3은 제안된 연접 기법에 대한 비트 오류율(BER; bit error rate) 성능을 보여준다. 송신단에서 고전력 증폭기의 output back off(OBO)<sup>[4,5]</sup> 값은 5dB로 설정하였으며, 가산 백색 가우시안 잡음(AWGN;

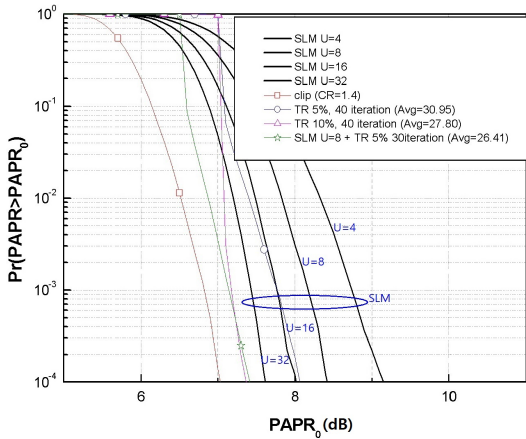


그림 2.  $N=256$ 일 때, 연접 기법에 대한 PAPR 감소 성능  
Fig. 2. PAPR reduction performance of the proposed concatenation scheme with  $N=256$

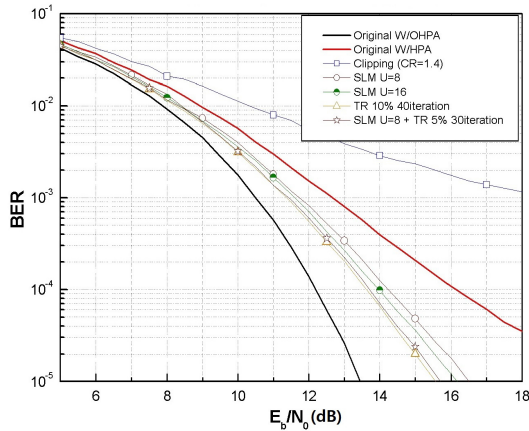


그림 3.  $N=256$ 일 때, 연접 기법에 대한 BER 성능  
Fig. 3. BER performance of the proposed concatenation scheme with  $N=256$

additive white Gaussian noise) 채널을 가정하였다.

본 논문에서는 OFDM 신호의 PAPR 감소를 통하여 동작 범위가 상대적으로 작은 저가의 HPA를 사용하는 시스템에서도 BER 성능의 열화를 줄이고 전송 효율 (throughput)을 향상시키려는 목적에서, PAPR 감소 성능은 우수하지만 전송 효율이 저하되는 문제가 있는 TR 기법과 다수의 IFFT 모듈을 확보하여야 하는 문제점이 있는 SLM 기법의 연접을 통하여 적응성 (flexibility)의 개선을 염두에 두었다. 그림 3에서 제안된 SLM( $U=8$ )/TR(5%) 연접 기법의 BER 성능이 예약된 톤의 비율 (데이터 전송률 손실 비율)이 10%인 TR 기법을 사용한 BER 성능과 유사함을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통하여 연접 기법을 사용할 경우에 시스템의 특성에 맞추어 적절하게 시스템의

가용 자원을 활용하는 방향으로 PAPR을 감소시키고 BER 성능을 개선할 수 있다는 점에서 본 연접 기법의 유용성을 확인할 수 있다.

한편, 그림 2와 그림 3에서, OFDM 신호의 PAPR을 줄이는 가장 간단한 방법은 클리핑이지만 이 방법은 신호를 극단적으로 왜곡할 수 있으며, 그에 따른 대역 내 왜곡 및 대역 외 방사를 야기하기 때문에 클리핑 기법만을 사용하여 BER 성능을 유지하면서 목표로 하는 PAPR에 도달할 수 없다는 사실을 확인할 수 있다.

추가적으로 다양한 톤의 개수를 고려하여 모의실험을 진행한 결과, 부반송파의 개수와 관계없이, 제안된 SLM/TR 연접 기법의 PAPR 감소 성능은 기존 단일 PAPR 감소 기법의 성능보다 우수함을 확인할 수 있었다.

#### IV. 결론

본 논문은 OFDM 시스템에서 기존 PAPR 감소 기법 중 SLM 기법과 TR 기법을 연접하여 계산 복잡도를 거의 증가시키지 않으면서도 OFDM 신호의 PAPR 감소를 위한 기존의 방법들과 비교하여 PAPR 성능이 개선됨을 확인하였다. 결국 본 논문에서 제안된 연접 기법은 특정 시스템 환경에서 BER 성능 열화 없이 PAPR 감소 성능이 우수하기 때문에 다양성 활용이 기대된다.

#### References

- [1] D.-W. Lim, S.-J. Heo, J.-S. No, and H. Chung, "On the phase sequence set of SLM scheme for crest factor reduction in OFDM system," *J. KICS*, vol. 31, no. 9C, pp. 889-896, Sep. 2006.
- [2] D.-W. Lim, H.-S. Noh, J.-S. No, and D.-J. Shin, "Adaptive TR scheme for PAPR reduction in OFDM system," *J. KICS*, vol. 33, no. 7, pp. 554-561, Jul. 2008.
- [3] H. Ochiai and H. Imai, "Performance of the deliberate clipping with adaptive symbol selection for strictly band-limited OFDM systems," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 18, no. 11, pp. 2270-2277, Nov. 2000.
- [4] H. Ochiai and H. Imai, "On the distribution of the peak to average power ratio in OFDM signals," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, no. 2,

pp. 282-289, Feb. 2001.

- [5] D.-W. Lim, S.-J. Heo, and J.-S. No, "An overview of peak-to-average power ratio reduction schemes for OFDM signals," *J. Commun. and Netw.*, vol. 11, no. 3, pp. 229-239, Jun. 2009.